

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**ANÁLISE TEMPO - FREQUÊNCIA DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO
EM VERTEDOR EM DEGRAUS**

Alfredo Ramón Lopez Fernández⁽¹⁾, Augusto Ceron Reginatto⁽²⁾, Felipe Correia Presser⁽³⁾, Alba Valéria Brandão Canellas⁽⁴⁾, Marcelo Giulian Marques⁽⁵⁾ e Luiz Augusto Magalhães Endres⁽⁶⁾

(1) FIUNA, Paraguai, lopito.82@gmail.com; (2) UFRGS - IPH, Brasil, augusto.creginatto@gmail.com, (3) UFRGS - IPH, Brasil, felipe.presser@ufrgs.br, (4) FURNAS, Brasil, alba@furnas.com.br, (5) UFRGS - IPH, Brasil, mmarques@iph.ufrgs.br, (6) UFRGS - IPH, Brasil, endres@ufrgs.br

RESUMO:

O trabalho, aqui apresentado, faz parte de uma pesquisa desenvolvida sobre Análise da Macro Turbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Induzida. A aeração pode trazer determinadas instabilidades ao escoamento, quando aerado em maior ou menor magnitude e em função da posição de início da aeração, visíveis pela movimentação em macro escala das regiões mais ou menos aeradas da água em escoamento. As investigações foram feitas sobre um modelo de vertedor em degraus, que conta com estruturas adicionais contribuindo para a aeração do escoamento. Foram realizadas medições de pressões flutuantes sobre um dos degraus e analisadas as distribuições de energia dessas flutuações, tanto através das estimativas de densidade autoespectral como de espectrogramas com esta mesma distribuição de energias das flutuações de pressão, mas avaliadas como variam ao longo do tempo. A interpretação dos resultados mostra a necessidade de buscar a complementação fornecida por essa análise conjunta, no domínio tempo-frequência, em fenômenos como os aqui estudados em que a estacionariedade do processo é assumida, sendo uma condição da aplicação das metodologias usuais na avaliação de parâmetros estatísticos para caracterizar escoamentos turbulentos.

ABSTRACT:

This work is part of a research developed on Analysis of Macro Turbulence in Stepped Spillways with Induced Aeration. Aeration can bring certain instabilities to the flow, when aerated to a greater or lesser magnitude and depending on the aeration start position, visible by the macro-scale movement of the more or less aerated regions of the water flow. The investigations were carried out on a stepped spillway model, which has additional structures contributing to the aeration of the flow. Pressure fluctuations measurements were carried out on one of the steps and the energy distributions of these fluctuations were analyzed, both through the autospectral density estimates and the spectrograms with this same energy distribution of the pressure fluctuations, but evaluated as they vary over time. The interpretation of results shows the need to seek the complementation provided by this joint analysis, in the time-frequency domain, in phenomena such as those studied here in which the stationarity of the process is assumed, being a condition for application of the usual methodologies in the evaluation of statistical parameters to characterize the turbulent flows.

PALAVRAS CHAVE: vertedor em degraus, flutuações de pressão, análise tempo-frequência.

INTRODUÇÃO

Os escoamentos macro turbulentos podem originar fenômenos hidráulicos bastante complexos, alvo de inúmeros estudos atuais, independente da estrutura em que são originados.

Nos vertedores em degraus, este tipo de escoamento recebe grande influência do tamanho dos degraus e das vazões escoadas por este tipo de estrutura hidráulica. A ampliação do conhecimento dos processos internos destes escoamentos pode ser utilizada na otimização de projetos, buscando, por exemplo, evitar a ocorrência de danos à estrutura e incremento de perdas de energia, para o que foi prevista.

A consideração, a priori, de comportamento estacionário dos parâmetros hidráulicos normalmente investigados em modelos físicos reduzidos deve ser confirmada ou, ao menos, avaliada em que medida pode ser assumida, visando dar base às conclusões e considerações finais dos estudos de laboratório. As características de pressões dinâmicas exercidas sobre os contornos sólidos desses escoamentos podem ser melhor esclarecidas com a investigação dos aspectos de repetitividade de efeitos ao longo de posições e instantes em que ocorrem.

O trabalho, aqui apresentado, faz parte de uma pesquisa desenvolvida por aluno do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional de Assunção – Paraguai, que está em fase de publicação. A pesquisa está inserida em um tema voltado à análise da macro turbulência em estruturas de dissipação de energia, através do estudo de variação instantânea das propriedades dos escoamentos no Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil, fazendo parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento Análise da Macro Turbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Induzida em parceria com o Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas Centrais Elétricas S. A.

A aeração do escoamento na calha dos vertedores em degraus, naturalmente ou através do uso de estruturas adicionais, é um ponto fundamental, seja na análise de perdas de energia, seja no amortecimento de pressões extremas no sentido de reduzir efeitos indesejados provocados pela incidência direta de jatos e pelo fenômeno da cavitação sobre os degraus. Este procedimento pode trazer determinadas instabilidades ao escoamento, quando aerado em maior ou menor magnitude, instabilidades estas visíveis pela movimentação em macro escala das regiões mais e menos aeradas da lâmina de água em escoamento, conforme pode ser visto na região demarcada por um círculo na figura 1-i, que mostra frontalmente o escoamento típico na calha do vertedor, exemplificado para uma das vazões investigadas.

A metodologia e interpretações dos resultados apresentados neste trabalho estão focadas somente nas flutuações das pressões, em parte provocadas pela movimentação das regiões com maiores ou menores concentrações de ar, sem considerações sobre valores médios ou outras representações gerais de parâmetros do escoamento sobre vertedores em degraus, direta ou indiretamente ligados às pressões. Não foram realizadas avaliações de caráter adimensional, transferências de valores para escalas de protótipo ou estabelecidas relações funcionais entre grandezas.

METODOLOGIA

A instalação experimental utilizada é um modelo reduzido parcial, em escala 1:10, de um vertedor em degraus. O modelo possui 2,45 m de altura, 0,40 m de largura e um canal de restituição a jusante. O vertedor possui uma inclinação de aproximadamente 53° com a horizontal e ogiva do tipo Creager projetada para uma carga de 0,4 m. Os degraus possuem 0,045 m de patamar e 0,060 m de espelho. O vertedor conta com estruturas adicionais, pilares e defletor, contribuindo para a aeração do escoamento ao longo da calha, cujo comportamento foi uma das motivações para a análise relatada neste trabalho. Maiores detalhes sobre a instalação podem ser encontrados em Lopez Fernández (2018).

A figura 1-ii apresenta uma vista lateral esquemática do vertedor em degraus com o detalhe das posições das tomadas de pressão no eixo longitudinal central do degrau 12, denominadas **a**, **b**, **c**, **d** no espelho e **e**, **f**, **g**, **h** no patamar.

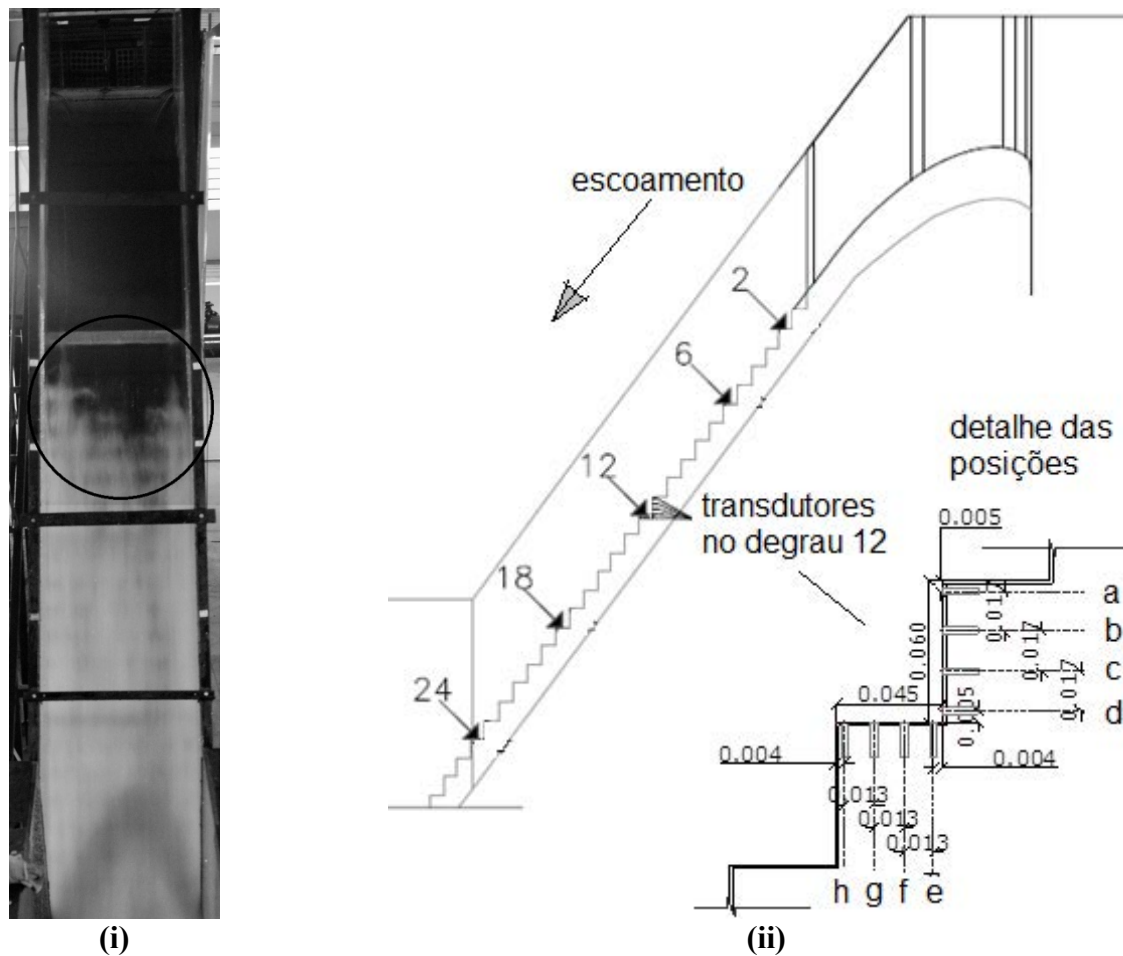


Figura 1.- Vistas (i) frontal do vertedor para a vazão $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ (escoamento de cima para baixo) e (ii) lateral do vertedor e detalhe das posições (**a**, **b**, **c**, **d**, **e**, **f**, **g**, **h**) das tomadas de pressão (medidas em m) no degrau de número 12.

Os valores de pressão foram medidos com transdutores eletrônicos de pressão SITRON e ZURICH, simultaneamente nas 8 tomadas, a uma frequência de aquisição de 100 Hz durante 15 minutos com hardware e software NATIONAL INSTRUMENTS, para 4 diferentes vazões de água (Q): $0,04$, $0,08$, $0,10$ e $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$, em escala de modelo. A tabela 1, a seguir, apresenta os valores de vazões específicas (q), alturas de água sobre a crista do vertedor (h_c) e os números de Froude (F) calculados no pé da calha do vertedor, todos em escala de modelo.

Tabela 1.- Características dos escoamentos investigados.

Q [m^3/s]	q [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]	h_c [m]	F [-]
0,04	0,100	0,101	7,44
0,08	0,200	0,160	6,91
0,10	0,250	0,185	6,34
0,11	0,275	0,198	5,98

Preliminarmente à análise dos dados brutos medidos, foram aplicados filtros digitais passa-banda implementados em software MATLAB, na faixa entre 1 e 30 Hz, identificada como de interesse no trabalho (<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/butter.html>).

Convertidos os valores de tensão elétrica provenientes dos transdutores para as pressões correspondentes no formato de alturas piezométricas em metros de coluna de água, foram utilizadas rotinas em MATLAB para obtenção de estimativas das funções de densidade autoespectral (<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>) e dos espectrogramas (<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>) característicos da análise no domínio tempo-frequência. A fundamentação da abordagem através de análise espectral utilizada está descrita em Bendat (2010).

As figuras 2 e 3 apresentam fotografias do aspecto geral da instalação e uma vista lateral do escoamento sobre os degraus, respectivamente.



Figura 2.- Aspecto geral da instalação.

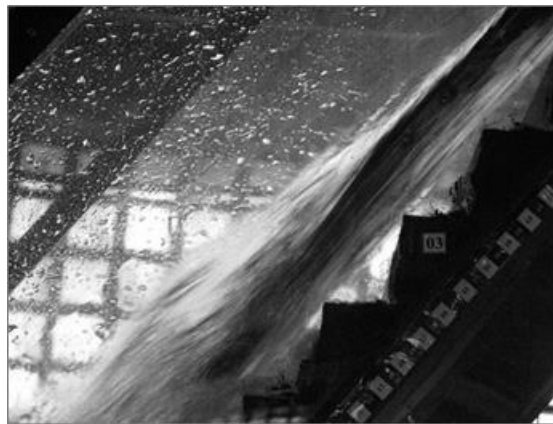


Figura 3.- Vista lateral do escoamento sobre os degraus.

RESULTADOS

Neste trabalho estão sendo apresentados somente os resultados das análises realizadas na pesquisa sobre o degrau 12 e com algumas avaliações e considerações ainda em etapa de confirmação, nesta data, no âmbito da pesquisa original.

A figura 4, a seguir, apresenta os gráficos com as estimativas das funções de densidades autoespectrais das flutuações de pressão para as vazões de $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$, tanto no espelho (tomadas **a**, **b**, **c**, **d**) como no patamar (tomadas **e**, **f**, **g**, **h**) do degrau de número 12 (ver figura 1). Este tipo de estimativa é, normalmente, empregada na representação da decomposição em frequência da flutuação de grandezas em processos estatisticamente considerados como estacionários.

Para todas as vazões, voltando a atenção para a região do patamar é possível perceber maior energia da flutuação no ponto mais próximo do final do patamar (tomada **h**), decrescendo em direção ao início (tomada **e**), em toda a faixa de frequências analisada.

Além disso, a distribuição de energia no início do patamar (tomada **e**) é praticamente uniforme em toda a faixa de frequências, sem a discreta elevação das ordenadas perceptível na faixa de frequências entre 6 e 10 Hz nas demais posições do patamar (tomadas **f**, **g**, **h**).

No espelho do degrau, por outro lado, este padrão de comportamento não se repete da mesma forma. Somente na posição mais baixa do espelho (tomada **d**) é possível identificar distribuição significativa de energia da flutuação de pressão, com discreta elevação em torno de 10 Hz. A ordem de grandeza da energia das flutuações associadas a esta posição (tomada **d**) coincide com a ordem de grandeza da energia das flutuações associadas à posição mais próxima no patamar (tomada **e**) validando, entre si, esses resultados obtidos.

Nas demais posições do espelho (tomadas **a**, **b**, **c**) a energia das flutuações de pressão é praticamente a mesma, para todas as vazões e em toda a faixa de frequências, e bastante reduzida em relação aos demais pontos de medição do patamar (tomadas **f**, **g**, **h**).

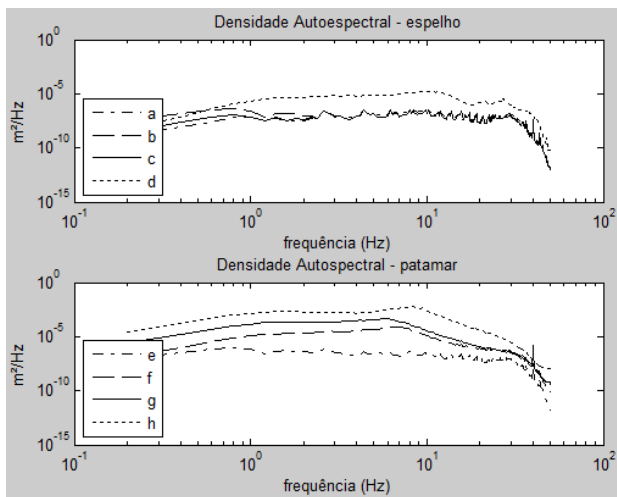
Alterando o enfoque da análise para os domínios tempo e frequência, simultaneamente, novas leituras podem surgir. Seguindo com os resultados, a figura 5 (referente ao espelho do degrau 12) e a figura 6 (referente ao patamar do degrau 12) apresentam os gráficos com as estimativas das distribuições de energia de flutuação das pressões para as vazões de 0,04 m³/s, 0,08 m³/s, 0,10 m³/s e 0,11 m³/s, na faixa de interesse das frequências (1 a 30 Hz), ao longo de todo o tempo de duração dos ensaios (900 segundos). Vale destacar que os gráficos monocromáticos foram montados para permitir a visualização, principalmente, das posições tempo - frequência com energia mais significativa e como suas ocorrências estão distribuídas ao longo da amostra.

A semelhança de comportamentos da distribuição de energia das flutuações de pressão entre as duas posições mais próximas entre espelho e patamar (tomada **d** no espelho e tomada **e** no patamar), apresentadas na análise das densidades autoespectrais, se existia não está confirmada quando comparadas as figuras 5 e 6.

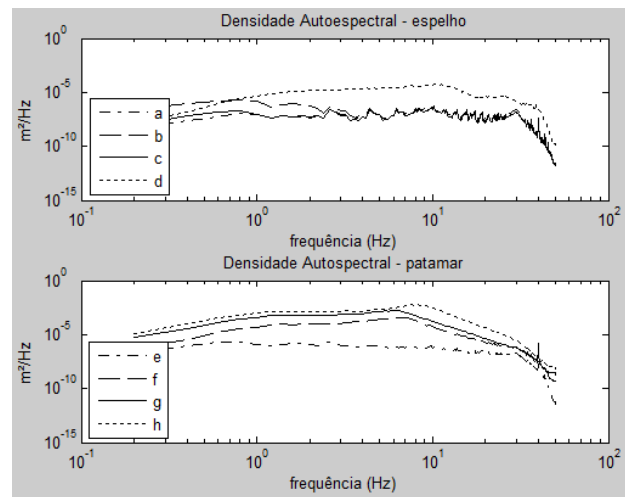
Os espectrogramas referentes à tomada **d** (figura 5) indicam distribuição semelhante para todas as vazões com uma faixa larga da distribuição, mas uniforme ao longo de todo o registro amostral. Valores maiores da energia são percebidos no escoamento com a vazão de 0,08 m³/s (figura 5-ii). Quanto à tomada **e** (figura 6), apresenta picos de energia, que surgem e desaparecem ao longo do tempo, em comportamento ainda sem identificação de um eventual padrão característico.

Com relação às demais posições, é significativa a variabilidade da distribuição de energia das flutuações de pressão ao longo do tempo nas posições mais altas do espelho (tomadas **a**, **b**, **c**), conforme a figura 5, sendo uma razão possível para este fato a reduzida energia dessas flutuações já identificada na figura 4, discutida na análise das densidades autoespectrais, o que aproxima os dados medidos do comportamento de ruídos inevitavelmente incorporados neste tipo de medição.

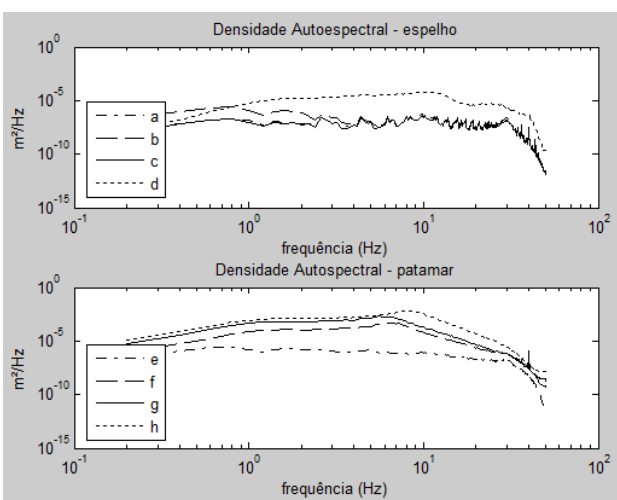
Voltando à análise do patamar, as posições mais próximas da quina do degrau (tomadas **f**, **g**, **h**), conforme a figura 6, apresentam uniformidade na distribuição de energia das flutuações de pressão ao longo do tempo, confirmando a faixa de frequências entre 6 e 10 Hz com maior concentração de energia, conforme anteriormente mencionado na análise da figura 4, referente às densidades autoespectrais.



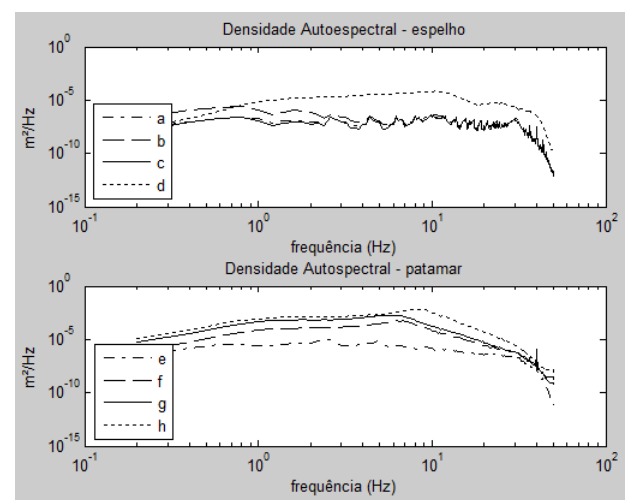
(i)



(ii)

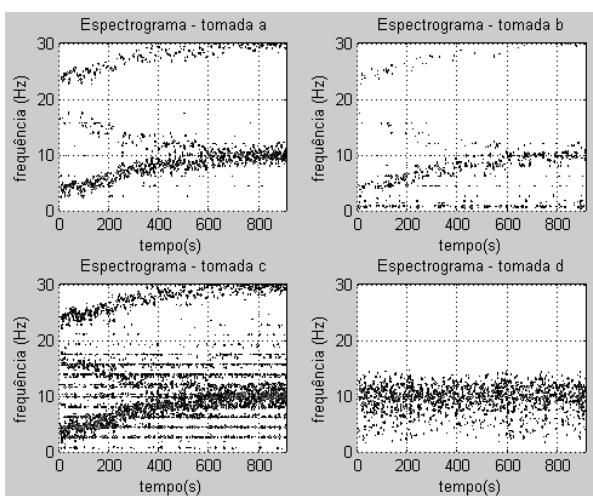


(iii)

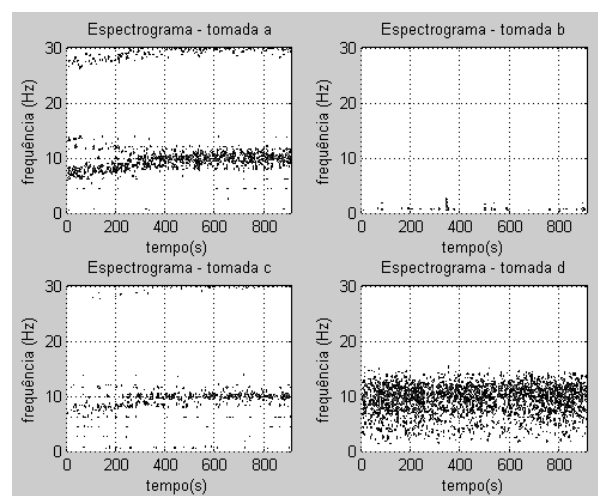


(iv)

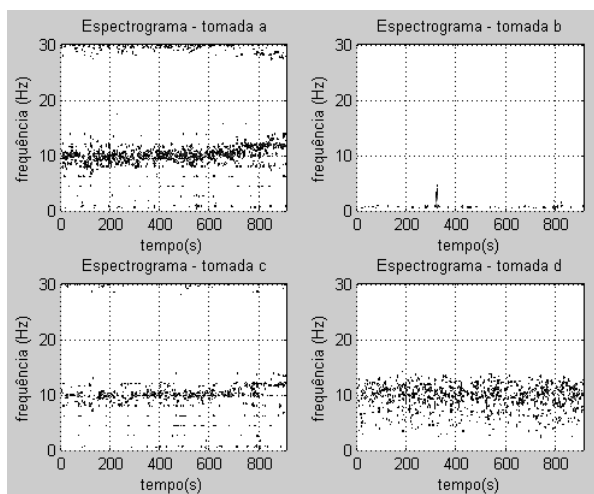
Figura 4.- Densidades autoespectrais das flutuações de pressão no espelho e patamar do degrau 12 para as vazões (i) $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, (ii) $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$, (iii) $Q = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e (iv) $Q = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$.



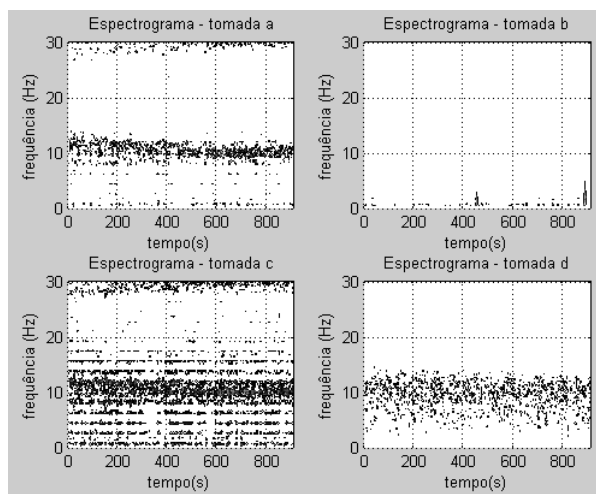
(i)



(ii)

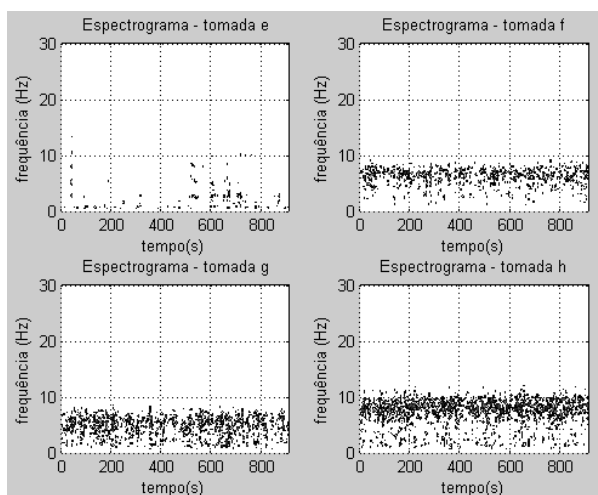


(iii)

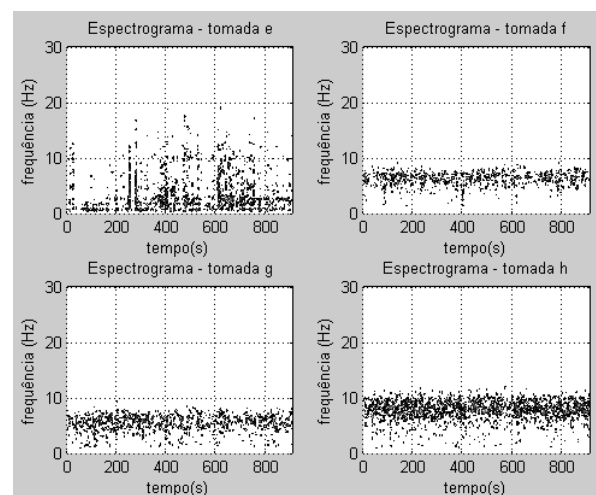


(iv)

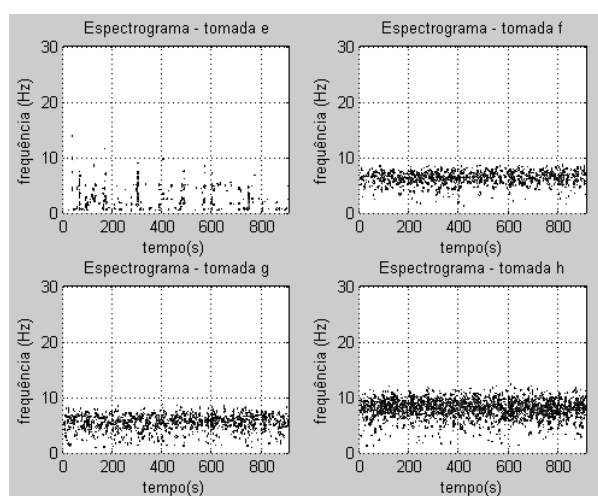
Figura 5.- Espectrogramas das flutuações de pressão no espelho do degrau 12 para as vazões (i) $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, (ii) $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$, (iii) $Q = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e (iv) $Q = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$.



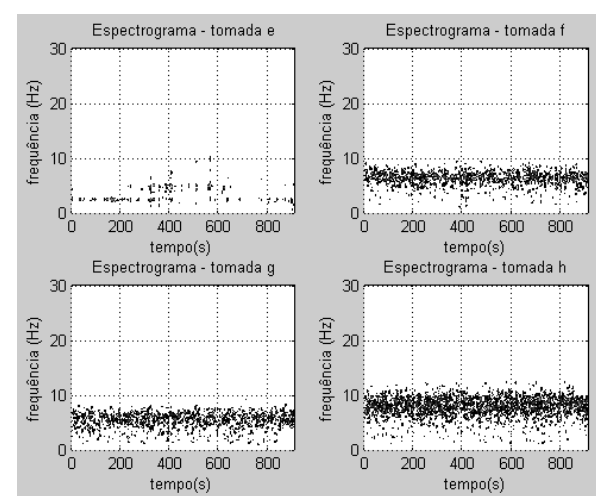
(i)



(ii)



(iii)



(iv)

Figura 6.- Espectrogramas das flutuações de pressão no patamar do degrau 12 para as vazões (i) $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, (ii) $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$, (iii) $Q = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e (iv) $Q = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação experimental de escoamentos em laboratórios de pesquisa em obras hidráulicas utiliza certos procedimentos, tais como considerar determinados fenômenos como estatisticamente estacionários, visando cumprir com requisitos de emprego de metodologias tradicionais de análise.

Este trabalho apresentou a necessidade de avaliar variabilidades de distribuição de energia das flutuações de pressão em degraus de vertedores, através da comparação das conclusões obtidas com base em estimativas de densidades autoespectrais e de sua distribuição ao longo de registros amostrais significativamente longos.

Características variáveis dos picos de energia ao longo do tempo, em diferentes posições de um degrau de vertedor, podem indicar a ocorrência e grau de intensidade de determinadas instabilidades ou oscilações do escoamento, por exemplo quando aerado em maior ou menor magnitude e em função da posição de início da aeração, instabilidades estas visíveis pela movimentação em macro escala das regiões mais ou menos aeradas da água em escoamento.

REFERÊNCIAS

Bendat, J. S. (2010). *Random data: analysis and measurement procedures*. 4. ed. John Wiley & sons. New York, USA.

Lopez Fernández, A. R. (2018). *Influencia de la aireación inducida por estructuras adicionales (pilar – deflector), en la distribución de las presiones dinámicas en vertederos escalonados – estudio experimental*. FIUNA (a ser impresso).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Dona Francisca Energética pela participação na montagem da infraestrutura inicial do modelo de vertedor em degraus utilizado nos experimentos e a Furnas Centrais Elétricas pela participação no projeto atual de pesquisa e desenvolvimento no qual este trabalho está inserido. Agradecem, também, ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil e à equipe de bolsistas, técnicos e pesquisadores do Laboratório de Obras Hidráulicas.

O primeiro autor agradece, em especial, ao Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Paraguay CONACYT, pelo financiamento da Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos - FIUNA.